framatome
Centre Technique Le Creusot

IMFT
INSTITUT DE MECANIQUE DES FLUIDES DE TOULOUSE

Société Française de Thermique SFT
Journée thématique : Mesures Thermiques et Techniques Inverses

Sujet :

Estimation d'un coefficient d'échange thermique en régime permanent et dynamique à partir d'un modèle 1D d'une sonde thermique

Présentée par : Imène LATIKI, thèse Cifre

Sous la direction de :

Alejandro MOURGUES (Framatome, alejandro.mourgues@framatome.com)

Christophe AIRIAU (IMFT)

Sébastien TANGUY (IMFT)

Mouad DAOUDI (Framatome)

11 juin 2026, FIAP Paris

Sommaire

1 Introduction

2 Problème inverse

3 Validation numérique du code inverse

4 Identification des paramètres d’influences.

5 Essai expérimental en écoulement monophasique

6 Conclusion

1. Introduction

Besoin industriel :

Estimation du coefficient d'échange thermique (HTC) moyen en régime permanent et de ses fluctuations en régime dynamique

Configurations expérimentales :

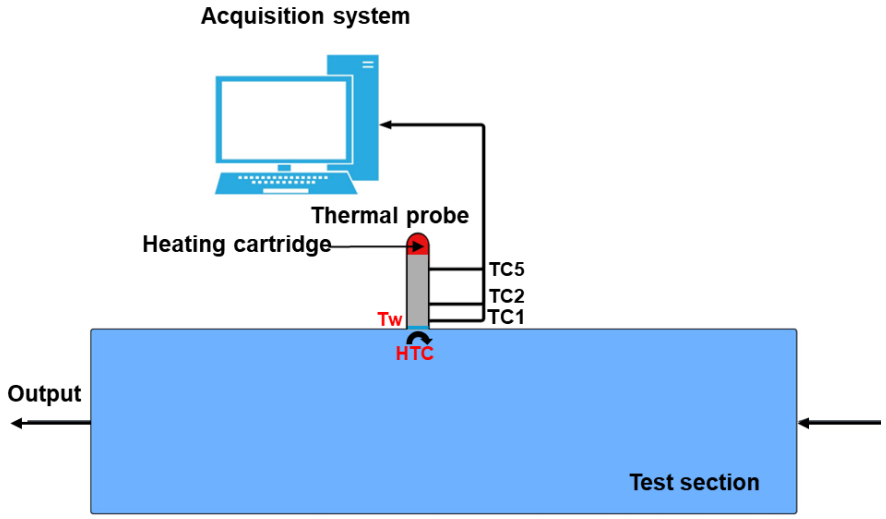


Figure : Configuration actuelle.

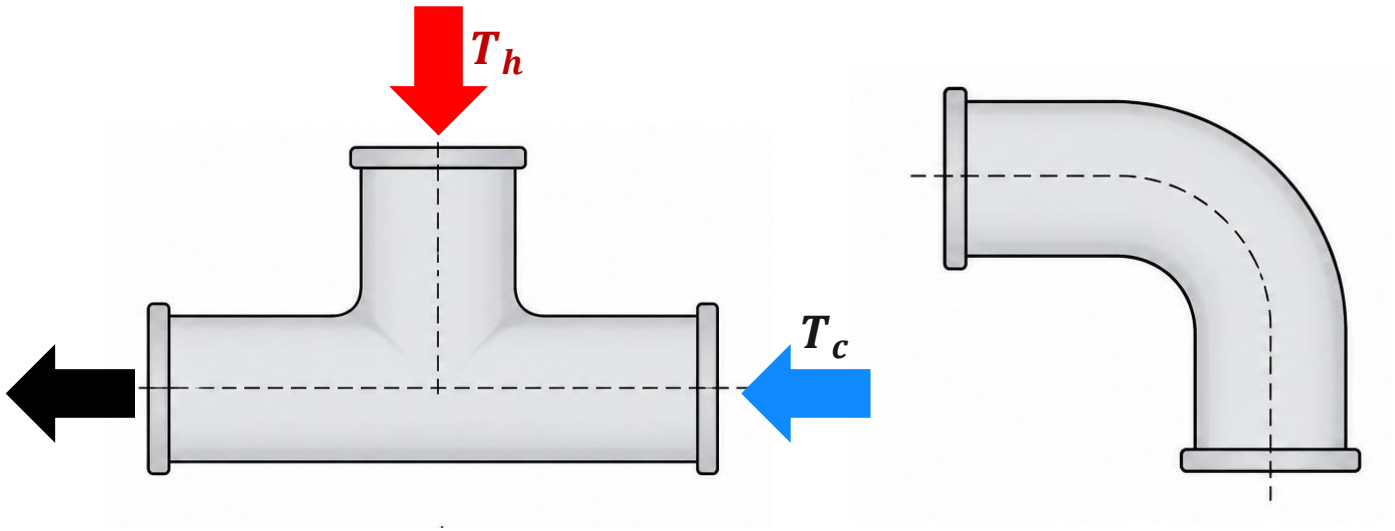


Figure : Autres configurations.

Plage d'intérêt de l'étude :

$Re \in [7\,10^3 ; 5\,10^5]$ et $f < 20\,Hz$

1. Introduction

Technique en développement :
Sonde thermique + calcul inverse

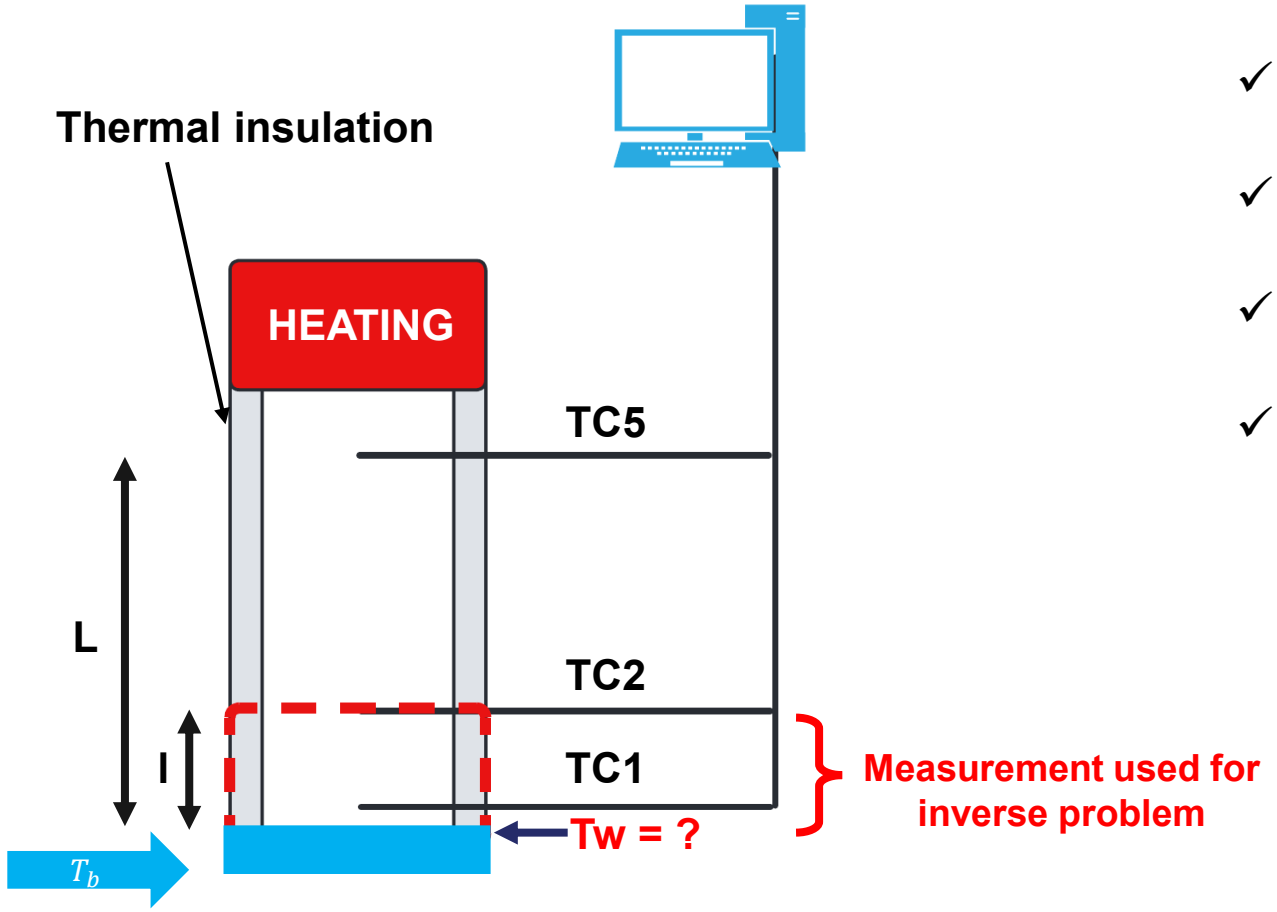


Figure : Schéma de la sonde thermique.

Probe specifications:

- ✓ Mesures non-intrusive
- ✓ Estimation locale du HTC moyen et ses fluctuations
- ✓ Mise en œuvre simple et rapide
- ✓ Applicable sur toute la plage d'étude expérimentale

2. Problème inverse

Modélisation numérique

But : estimation du HTC : $HTC = \frac{q_w}{T_w - T_b}$

Hypothèses :

- Sonde thermique **isolée** : gradient radial et pertes thermiques négligeables
- Propriétés thermo-physiques **constantes** : faible gamme de température

Conduction thermique instationnaire 1D

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

Avec $\alpha = \frac{k}{\rho\, Cp}$ $[m^2/s]$: la diffusivité thermique de la sonde

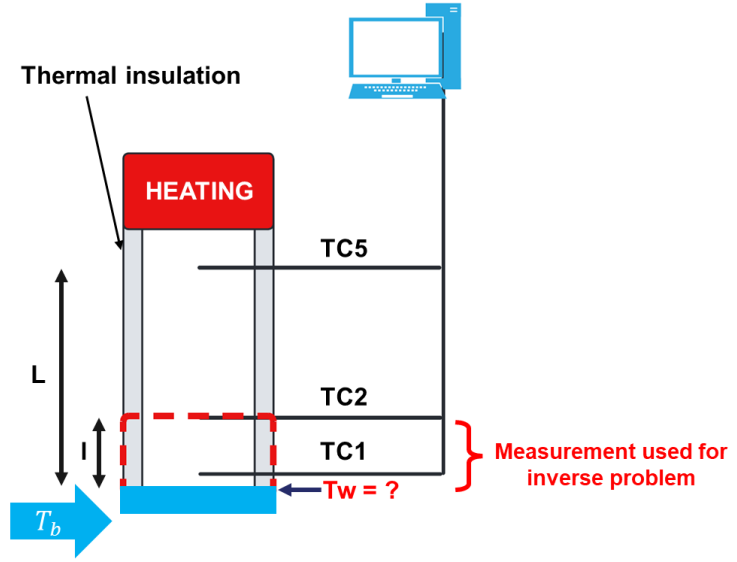


Figure : Schéma de la sonde thermique.

Conditions aux limites

T(t, x_{TC2}) = $TC2(t, x_{TC2})$ (connue, mesure expérimentale)

T(t, $\boldsymbol{x_L}$) = $\boldsymbol{Tw(t, x_L)}$ (à estimer, calcul inverse)

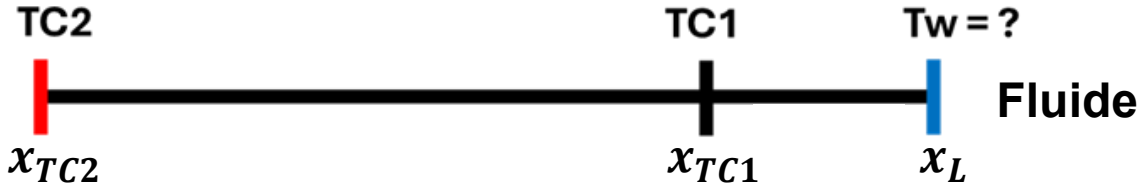


Figure : Schéma des points de mesure des températures.

2. Problème inverse

Algorithme de résolution

Entrée : mesures expérimentales filtrées : $TC2_{exp}, TC1_{exp}\ et\ T_f$

Initialisation : solution du problème de conduction 1D stationnaire

$$T(x) = a\,x + b$$

Zéro d'une fonction [1, 2] : méthode itérative la sécante

Fonction scalaire :

$$Error^{(n+1)} = \frac{TC1_{exp}^{(n+1)} - TC1_{cal}^{(n+1)}}{TC1_{exp}^{(n+1)}} < Tolerance$$

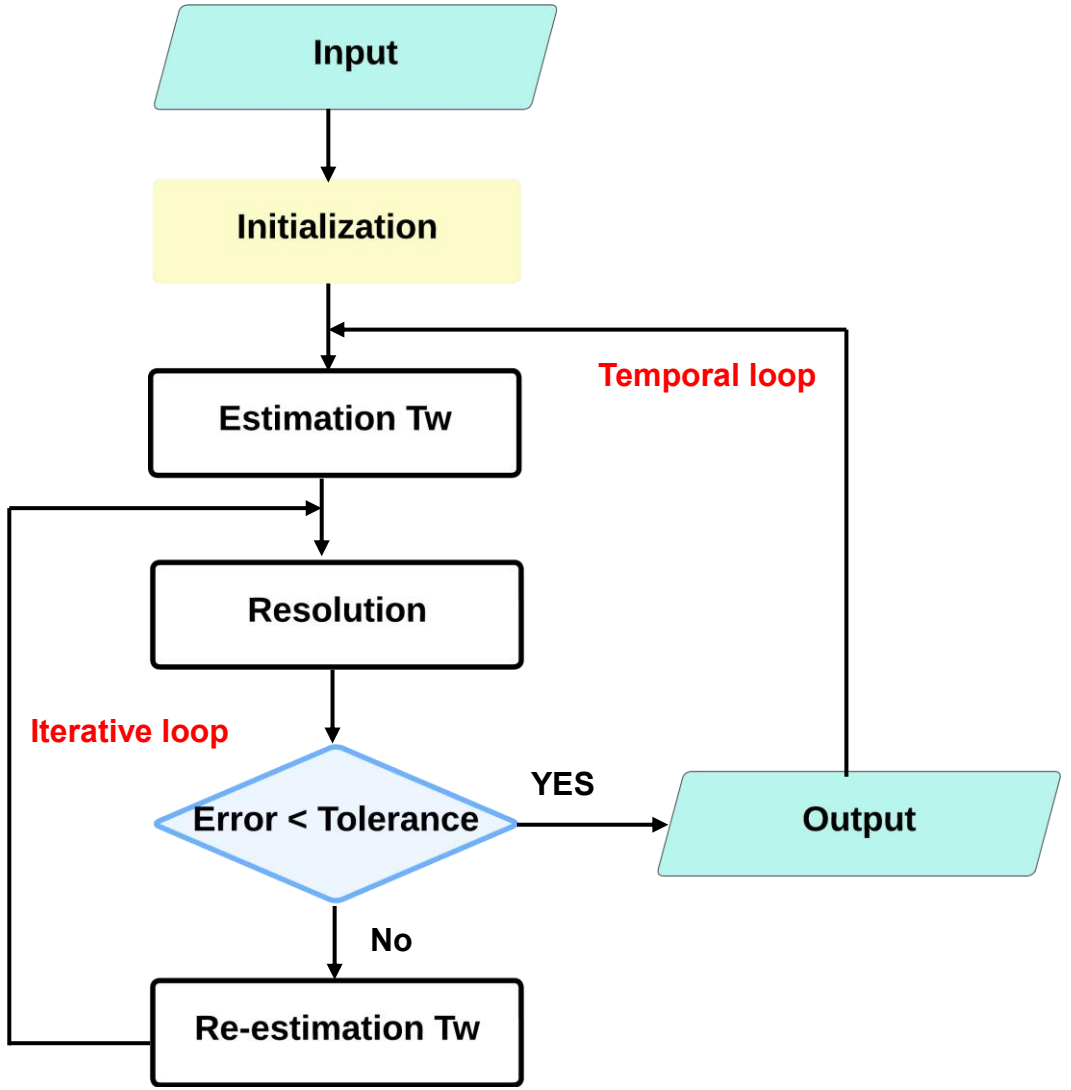
Calcul densité de flux thermique q_w par bilan de flux

$$q_w^{(n+1)} = -k\,\frac{T_{w-1}^{(n+1)} - T_{w-2}^{(n+1)}}{\Delta x} - \rho\ C_p\ \Delta x\ \frac{T_w^{(n+1)} - T_w^{(n)}}{\Delta t}$$

Calcul du coefficient d'échange thermique HTC

$$HTC^{(n+1)} = \frac{q_w^{(n+1)}}{T_w^{(n+1)} - T_b^{(n+1)}}$$

Sortie : HTC



3. Validation numérique du code inverse

Approches de résolution

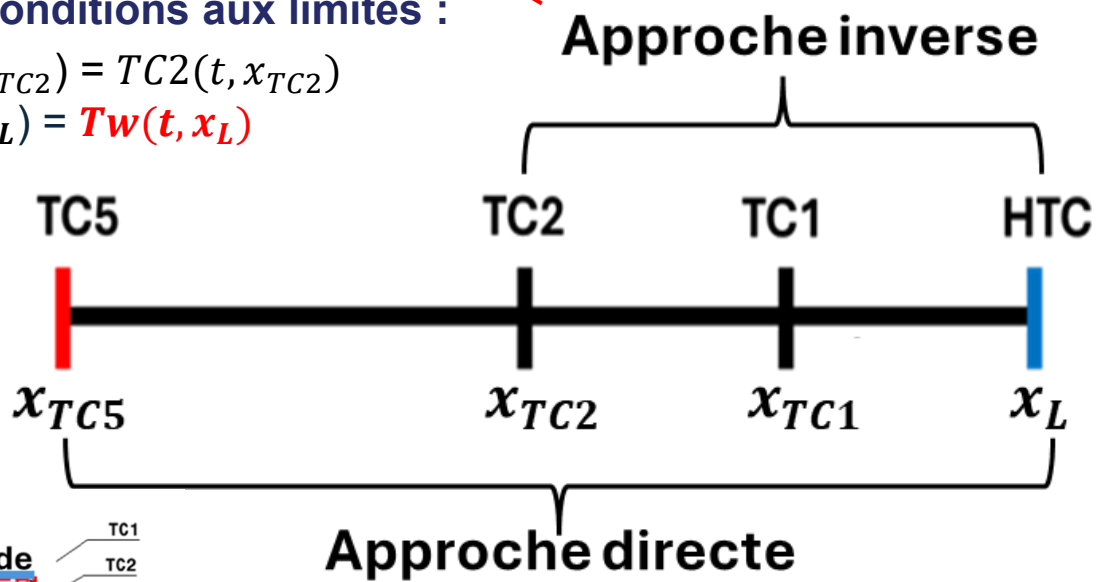
But :

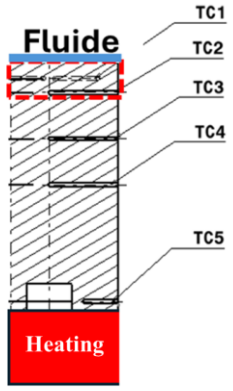
Estimations du HTC

Conditions aux limites :

T(t, x_{TC2}) = $TC2(t, x_{TC2})$

T(t, x_L) = $Tw(t, x_L)$





But :

Estimations TC2 et TC1

Conditions aux limites :

T(t, x_{TC5}) = $TC5(t, x_{TC5})$

HTC(t, x_L) = $\bar{h} + A \sin(2 \pi f t)$

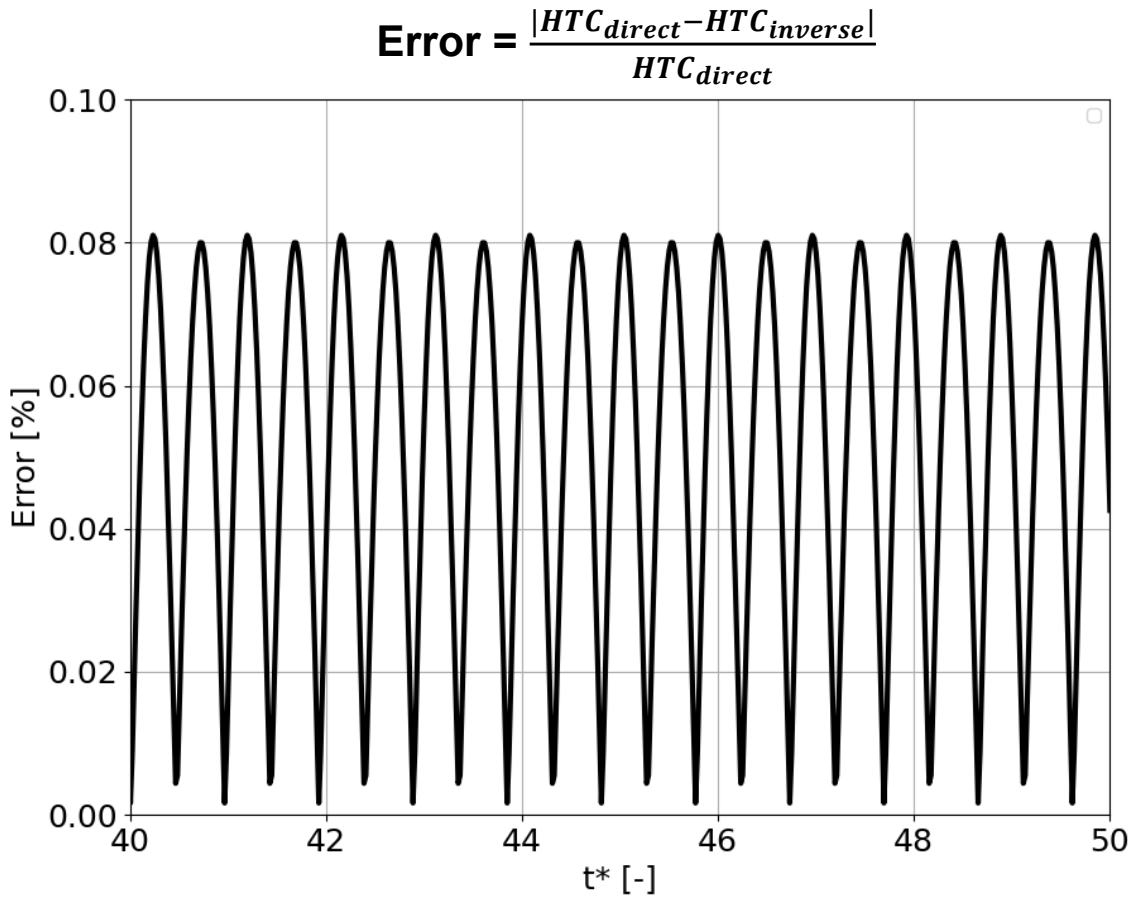
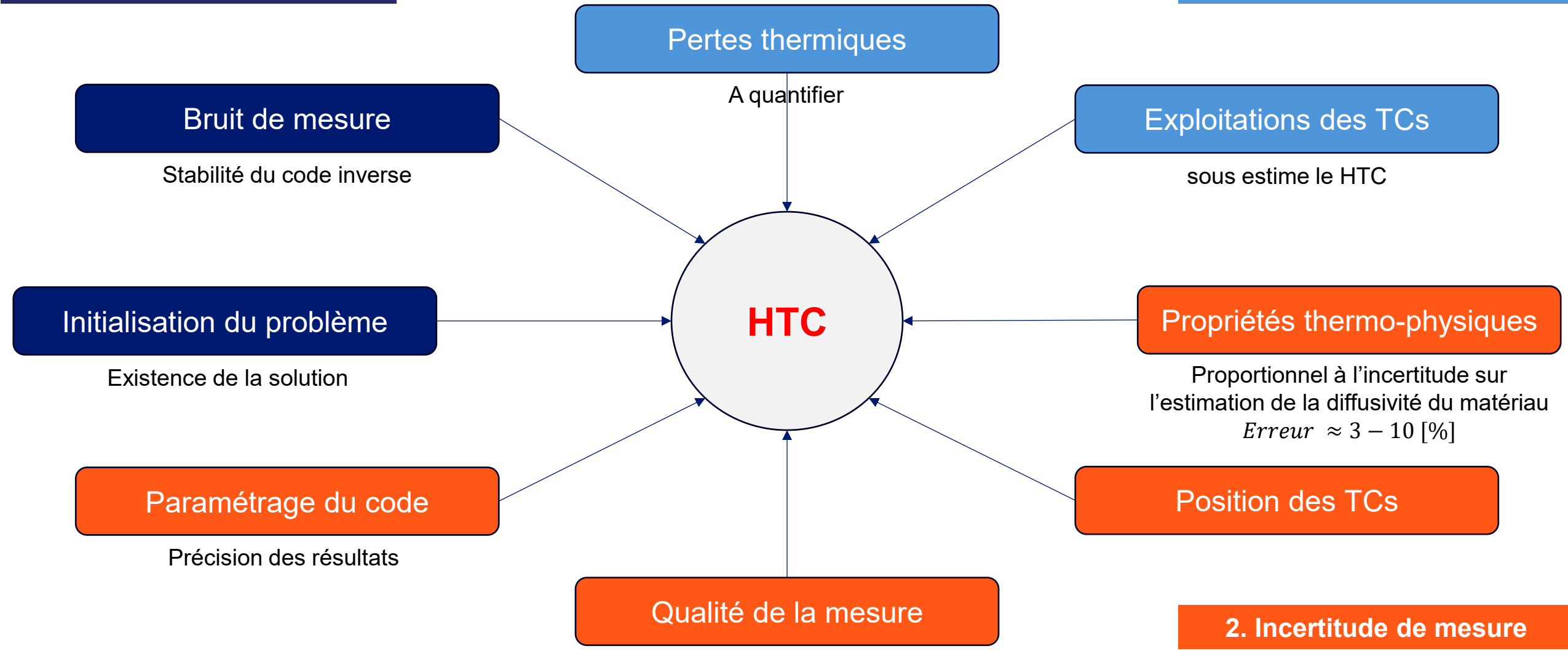


Figure : Variation temporelle de l'erreur relative du HTC entre le calcul direct et inverse, cas $\bar{h} = 4000\ [W/(m^2.K)]$ et $A = 0.05\ \bar{h}$

4. Identification des paramètres d'influences

3. numérique

1. physique



2. Incertitude de mesure

4. Identification des paramètres d'influences

Effet du bruit de mesure

Calcul direct
- Input : TC5, **HTC**, Tf
- Output : TC2, TC1..

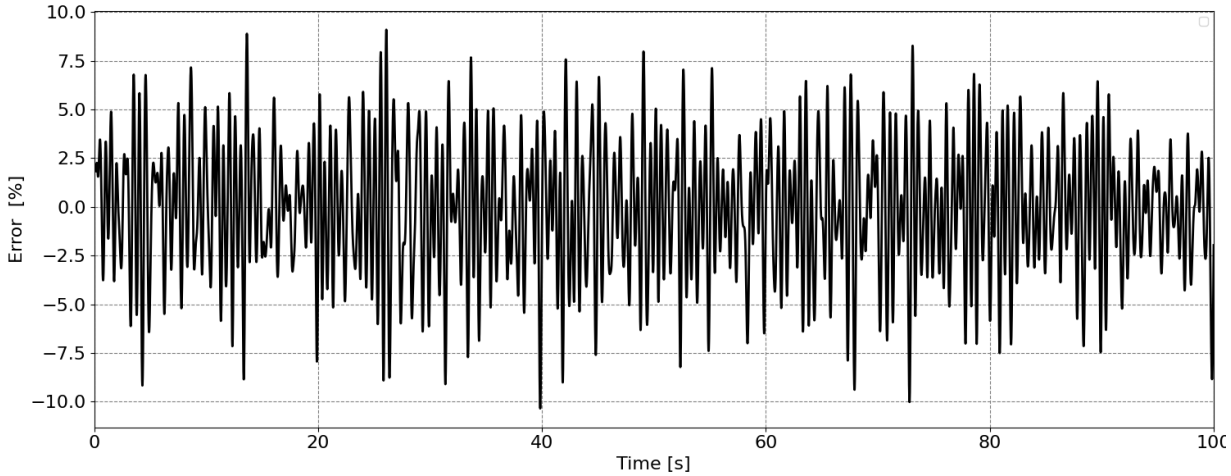
Perturbation
- Ajout d'un bruit numérique à TC2, TC1, Tf

Filtre numérique
- Filtre passe-bas : Butterworth

Calcul inverse
- Input : TC2, TC1 et Tf (filtrées)
- Output : **HTC**

$$Error = \frac{HTC_{ref} - HTC_{inv}}{HTC_{ref}}$$

Erreur relative du HTC moyen 0.04 [%]



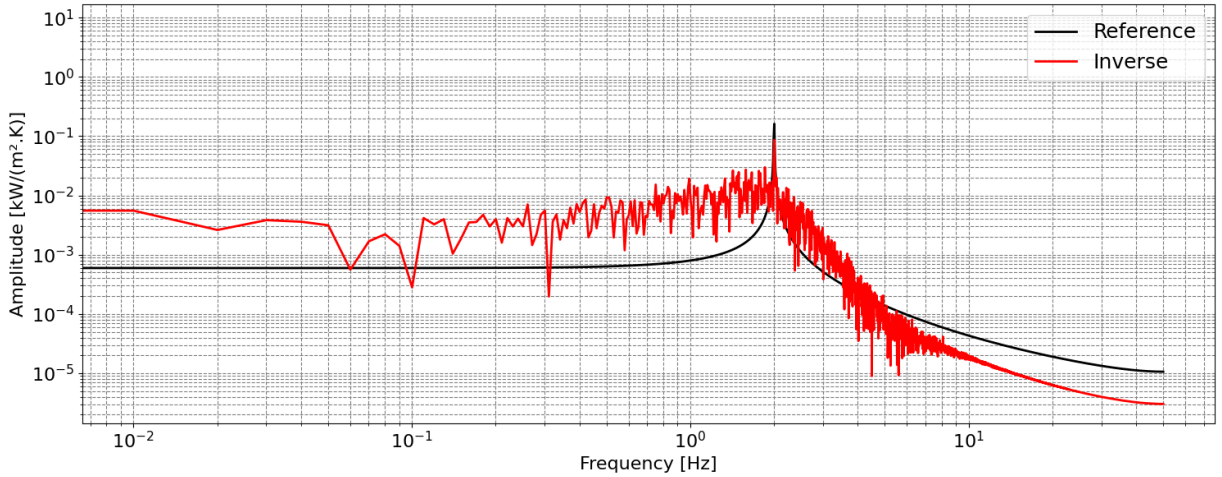


Figure : analyse de l'effet du bruit de mesure

5. Essai expérimental en écoulement monophasique

Présentation de la maquette

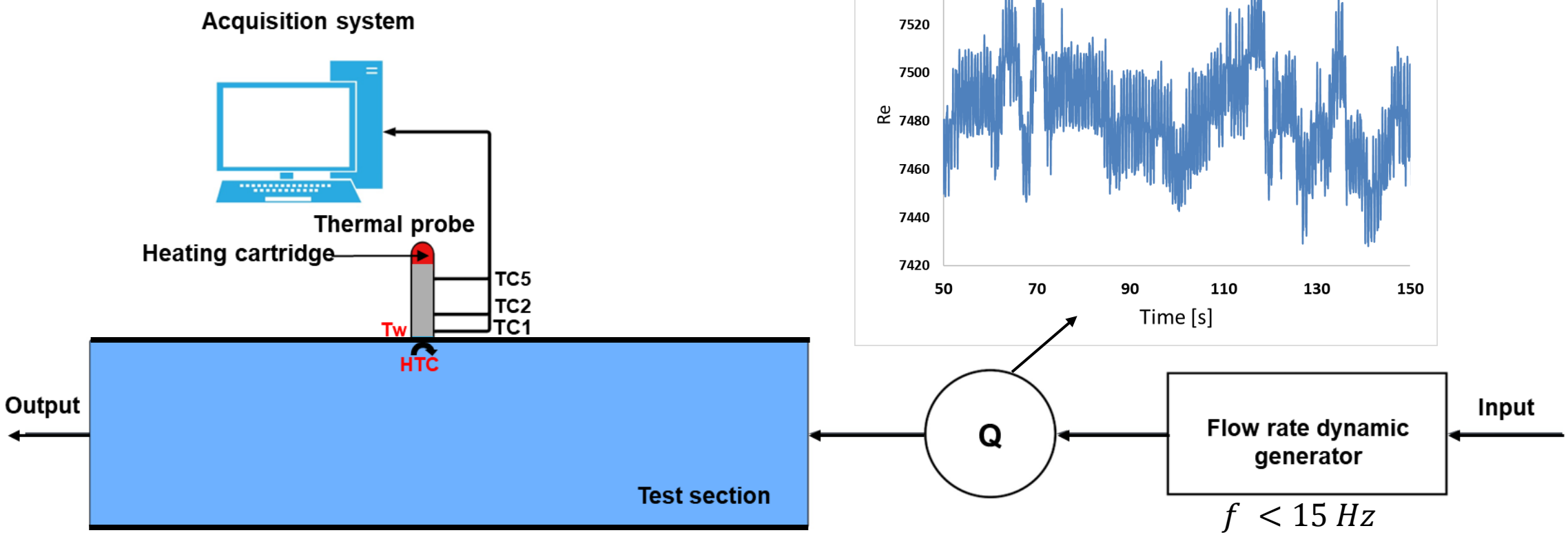
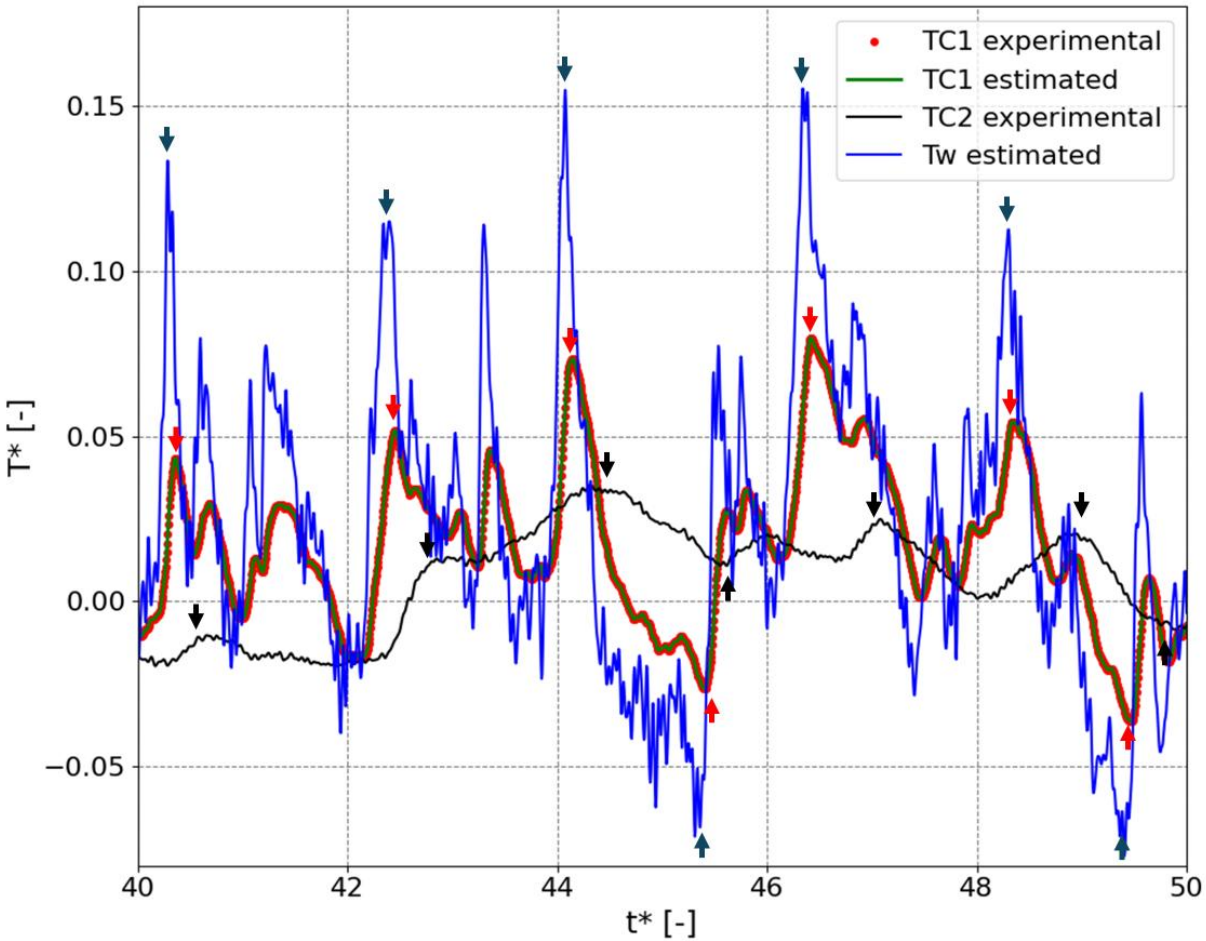


Figure : Variation temporelle du nombre de Re et ses fluctuations.

5. Essai expérimental en écoulement monophasique

Résultats : effet de diffusivité thermique

$$T_i^* = \frac{\bar{T}(t, x_i) - T(t, x_i)}{\Delta T}$$



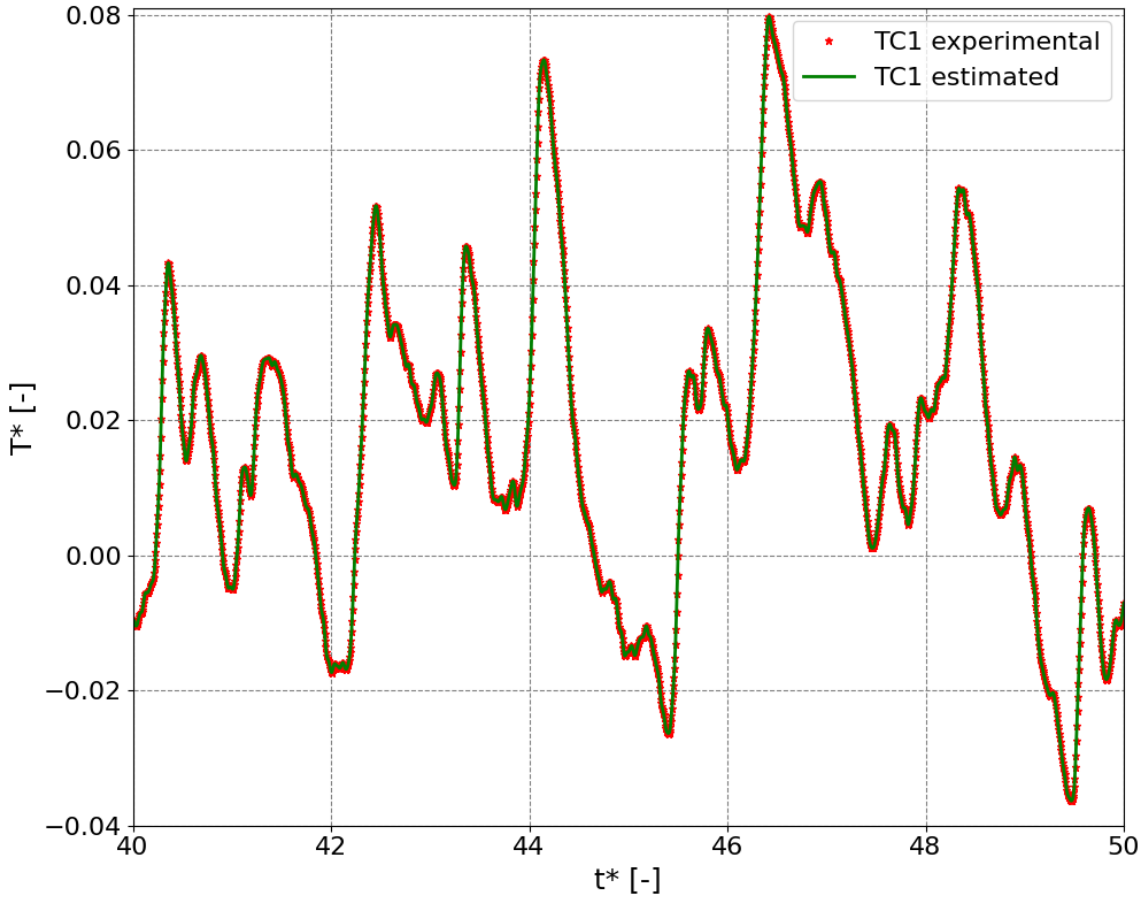


Figure : Variation temporelle des écarts des températures sans dimensions, TC2, TC1 et Tw.

5. Essai expérimental en écoulement monophasique

Résultats : estimation du nombre de Nusselt

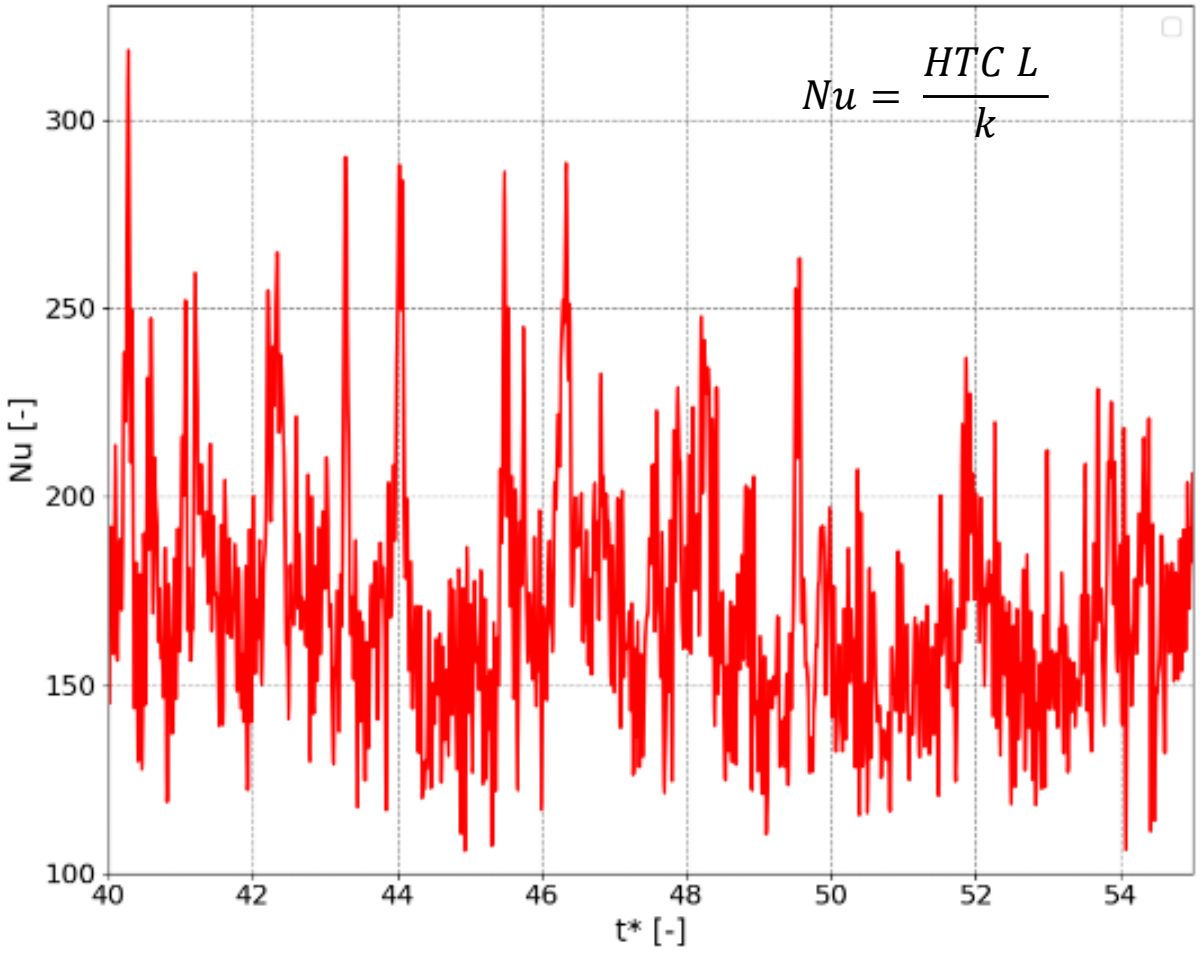


Figure : Variation temporelle du nombre de Nusselt.

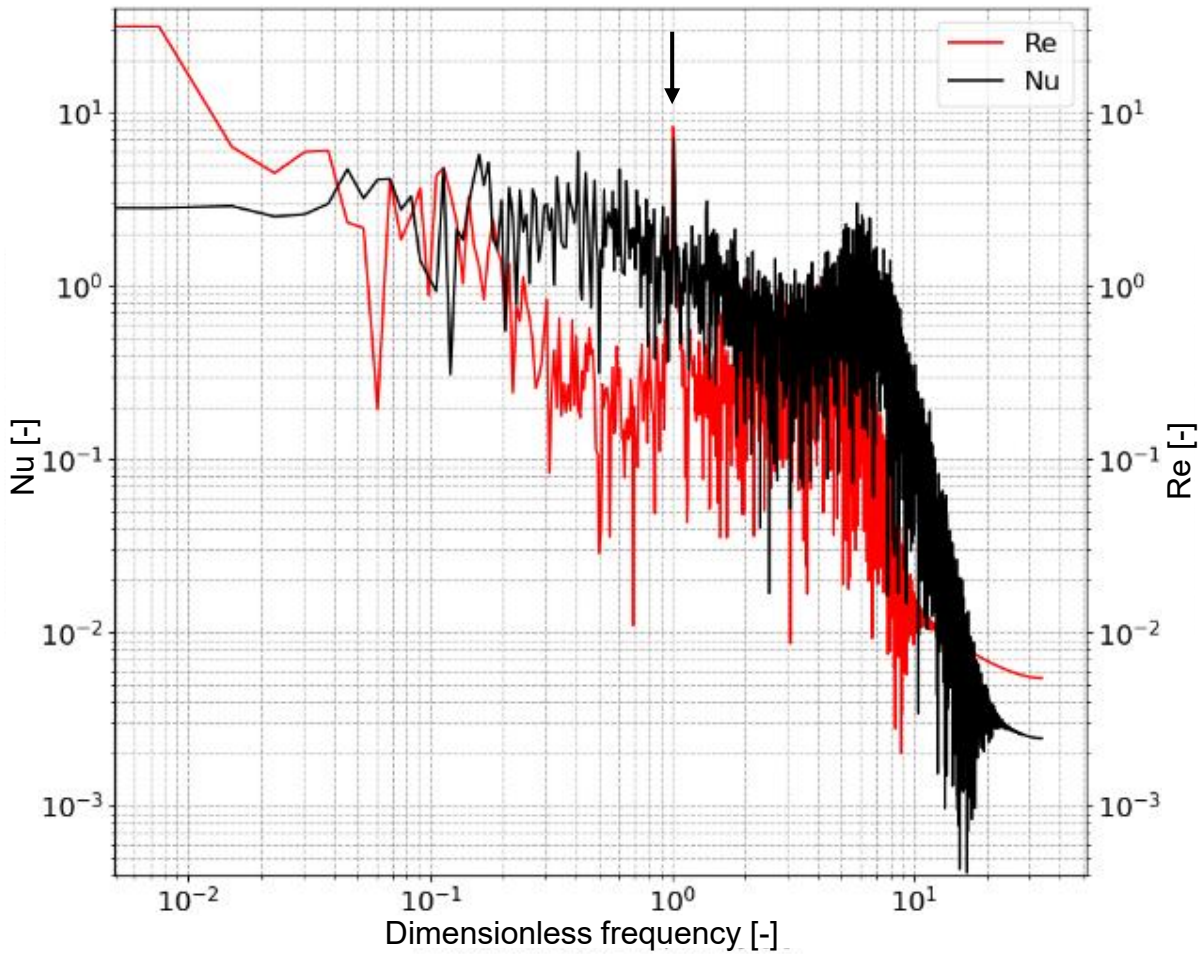


Figure : FFT des nombres de Nusselt et Reynolds.

6. Conclusion

Sonde thermique

✓ Capable de capter les fluctuations des écoulements en régime dynamique

✓ Applicable à des écoulements monophasiques

Code inverse

✓ Le modèle numérique répond à la physique attendue dans la gamme expérimentale identifiée

✓ Convergence numérique est assurée, même en utilisant des données bruitées

✓ La stabilité du code est liée à la présence ou pas du bruit

✓ Choix de paramétrage : propriétés thermo-physiques constantes ou variables

✓ Choix de la boucles itératives : Sécante, Newton

Travail en cours et perspectives

❑ Essais expérimentaux

- Monophasique avec des sondes optimisées
- Estimation d'incertitude sur HTC
- Ecoulement diphasique
- Mesure dans une zone de mélange de fluides

❑ Etudes numériques

- Validation numérique de la réponse de la sonde (HTC en régime permanent) sur la veine monocanale.
- Estimation et intégration des pertes thermiques dans le code inverse

Références

[1] O. Uyanna, H. Najafi. A novel solution for inverse heat conduction problem in 1D medium with moving boundary and temperature-dependent material properties. Int. J. Heat and Mass Transfer, 182, 2022.

[2] J. Hadamard. Lectures on the Cauchy's Problem in Linear Partial Differential Equations. Yale University Press, New Haven, 1923, Recent edition: Nabu Press, 2010.


Merci